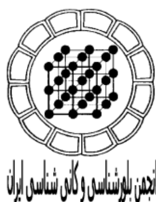
مجله
بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و یکم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۴۰۲، از صفحهٔ ۷۰۹ تا ۷۲۰



زمین‌شیمی، کانی‌شناسی و شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی چنگرزه (جنوب نطنز): رهیافتی برای ردیابی ذخایر برون‌زاد سرب و روی با سنگ میزبان کربناتی

ابراهیم طالع فاضل*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۳/۱۷)

چکیده: بررسی شرایط زمین‌شیمیایی-فلززایی و کانی‌شناسی برای تفسیر شرایط اکسایش برون‌زاد، تحرک، جدایش و ته‌نشست دوباره فلزها در تشکیل ذخایر سرب و روی غیرسولفیدی اهمیت بسیاری دارد. کانسار سرب-(نقره) چنگرزه که در این پژوهش به عنوان یک الگو بررسی شده در سنگ میزبان دولستون‌های برشی تریاس میانی در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال‌شرقی اصفهان، واقع شده است. کانه‌زایی به دو صورت درون‌زاد سولفیدی و برون‌زاد غیرسولفیدی (اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی)، رخ داده است که فراوانترین کانی‌های بخش برون‌زاد اسمیت‌زونیت، همی-مورفیت، هیدروزینسیت، انگلزیت و سروزیت هستند. برپایه شواهد بدست آمده، جداسازی فلز بخش برون‌زاد در اثر تغییر تدریجی از ناحیه اکسایش اسیدی به شرایط قلیایی در سنگ دیواره کربناتی میزبان رخ داده است. پس از آن، تشکیل منطقه اکسایش در سنگ میزبان کربناتی با ایجاد "زره‌بندی" گالن توسط انگلزیت و چند واکنش بافر کننده pH تسهیل شده است. فعالیت بالای یون‌های SO_4^{2-} در ارتباط با اسید سولفوریک طی مرحله اکسایش منجربه رسوب انگلزیت نامحلول و کاهش چشمگیر Pb^{2+} در سیال باقی مانده می‌شود. براساس شواهد این پژوهش، محدود بودن آب‌های جوی و سفره‌های آب زیرزمینی عمیق از کانسنگ غیرسولفیدی در برابر انحلال بعدی محافظت می‌کند که درک این شرایط نقش مهمی در ردیابی ذخایر برون‌زاد غیرسولفیدی دارد.

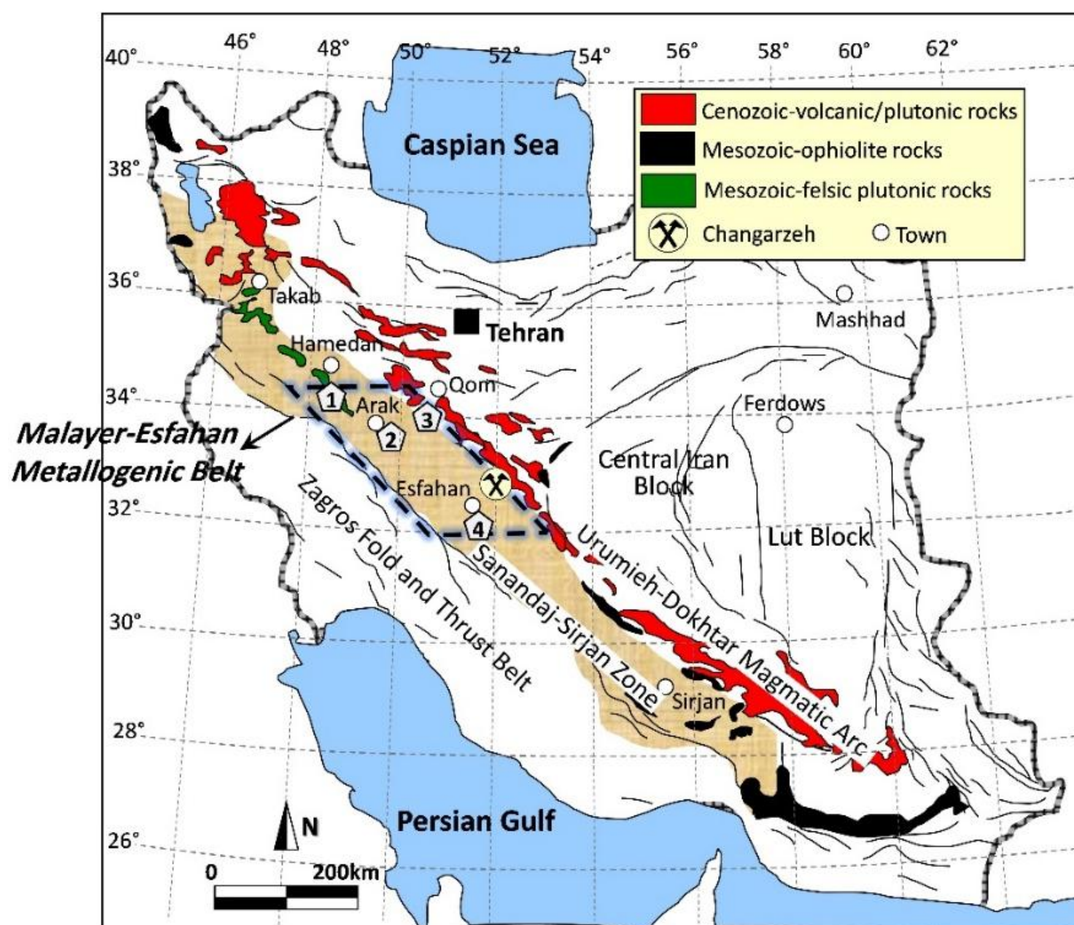
واژه‌های کلیدی: *کانسنگ غیرسولفیدی؛ واکنش‌های برون‌زاد؛ شرایط زمین‌شیمیایی-فلززایی؛ کمربند فلززایی ملایر-اصفهان.*

مقدمه

تفسیرهای زمین‌شیمیایی-فلززایی اغلب برای ذخایر سرب-روی غیرسولفیدی برون‌زاد با سنگ میزبان کربناتی در ارتباط با محیط-های کارست مطرح شده است [۱، ۲]. ذخایر سرب و روی کارستی رایج‌ترین ذخایر غیرسولفیدی هستند که از کانی‌های روی رایج در آنها می‌توان به همی‌مورفیت ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2·H_2O$)، هیدروزینسیت: ($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$) و کربناتیای روی (اغلب اسمیت‌زونیت: $ZnCO_3$) اشاره کرد [۲]. تاکنون بیش از ۳۰۰ کانسار و نشانه معدنی سرب و روی در ایران شناسایی شده است که کمتر از ۶ درصد از این ذخایر به‌صورت فعال استخراج می‌شود [۳]. در این میان، کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناتی از مهمترین منابع تأمین کننده‌ی سرب و روی در ایران بوده که دارای گستره‌ی سنی پروتروزوئیک پسین تا سنوزوئیک هستند [۴]. از بین آنها، کمربند فلززایی ملایر-اصفهان با راستای شمال-غربی-جنوب‌شرقی، بزرگترین منطقه فلززایی سرب-روی (نقره) ایران است [۳، ۴]. این کمربند در بخش میانی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان (وابسته به کوهزاد زاگرس) واقع است که ذخایر مهمی چون آهنگران، ایرانکوه، راونج و عمارت از آن معرفی شده‌اند (شکل ۱). پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های استخراج و فراوری ذخایر سرب و روی غیرسولفیدی منجربه افزایش علاقه تجاری و پی جویی این نوع ذخایر در سراسر جهان شده است که به ویژه در آغاز قرن بیست و یکم شکوفا شد [۵]. کانسار چنگرزه با ذخیره قطعی ۲۵۰ هزار تن، دارای استخراج سالیانه ۱۵۰۰۰ تن با عیار

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۸۳۱۱۸۷۹۶، پست الکترونیکی: e.talefazel@basu.ac.ir

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]



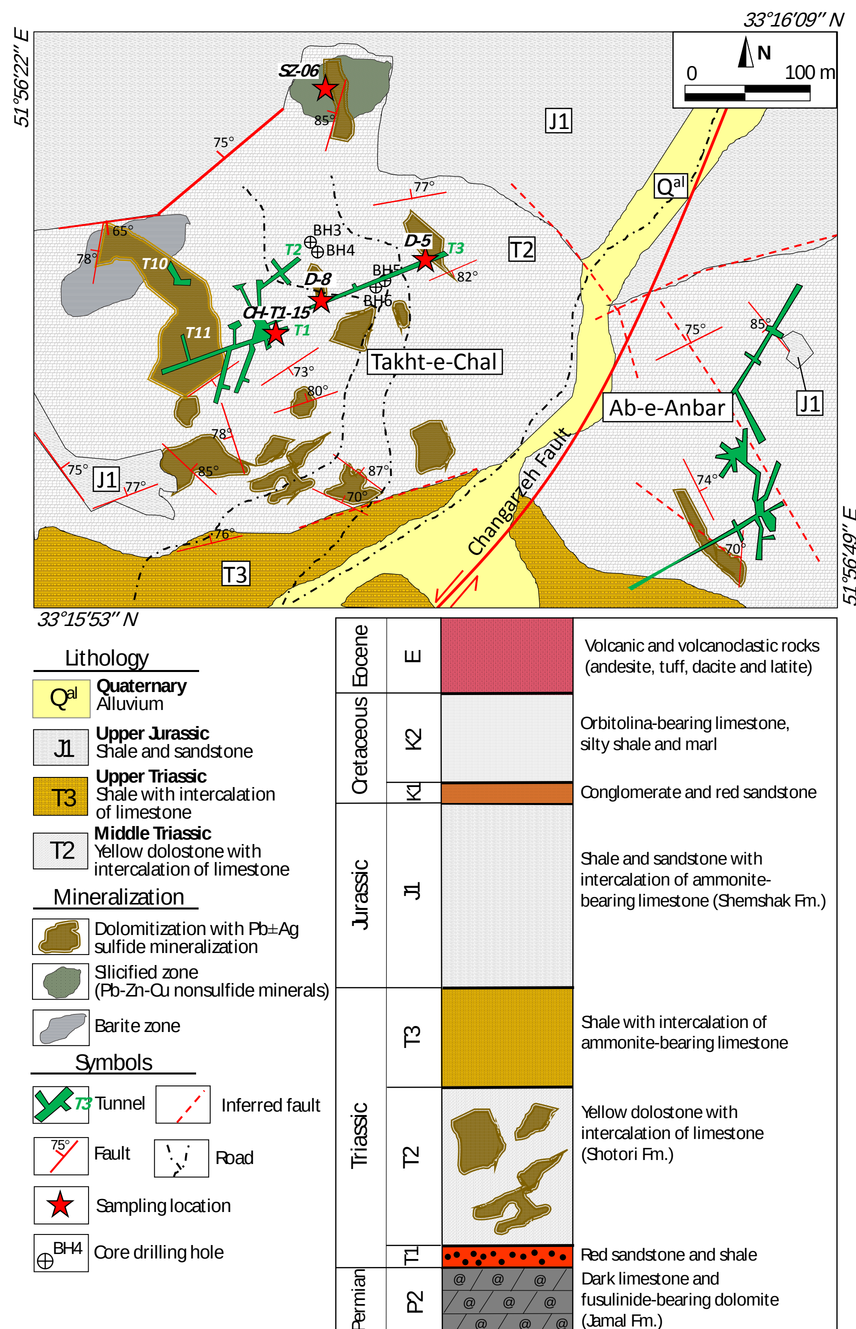
شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده ایران و موقعیت کانسار چنگرزه در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان همراه با سایر ذخایر سرب و روی کربناتی شامل ۱) آهنگران (سرب±نقره و آهن)، ۲) عمارت (سرب و روی)، ۳) راونج (سرب و روی± نقره) و ۴) ایرانکوه (سرب و روی).

۱۰٫۸ درصد سرب، ۱٫۹۹ درصد روی و ۶۹ گرم در تن نقره است [۶]. این کانسار از قدیمی‌ترین معادن استان اصفهان بوده که از دیرباز عملیات پی جویی-استخراجی گسترده‌ای در آن انجام شده و اکنون به‌صورت یک معدن نیمه فعال است.

در این پژوهش، شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چنگرزه (جنوب نطنز) از دیدگاه زمین‌شیمیایی-فلززایی تعیین شده است. این امر امکان بررسی واکنش‌های اکسایش سولفید، درک بهتر این گروه از ذخایر سرب و روی و سرانجام بهبود مدل‌های پی جوییی را فراهم می‌کند. این پژوهش به‌طور عمده بر چگونگی جدایش فلزهای سرب و روی و تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چنگرزه بر پایه اقلیم‌های خشک/گرم متمرکز است.

روش بررسی

برای دستیابی به اهداف تعیین شده، از واحد سنگ میزبان کربناتی و کانسنگ غیرسولفیدی از تونل‌ها و رخنمون‌های صحرایی نمونه برداری شد. موقعیت نمونه‌های برداشت شده در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از آن، ۲۰ مقطع نازک‌صیقلی با میکروسکوپ‌های عبوری-بازتابی قطبشی زایس مدل Axioplan2 سنگ نگاری شدند. سپس به منظور شناسایی کانی‌های ثانویه سرب و روی (کربناتی-اکسیدی)، تعداد ۱۰ نمونه پودر سنگ (به اندازه ۷۵ میکرون) با پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD) فیلیپس X′pert با لامپ کبالت)، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (کرج) طیف‌سنجی گردیدند. برای شناسایی دقیق کانه‌های غیرسولفیدی پس از انجام اندود طلا (با ضخامت تقریبی ۲۰۰ آنگستروم)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدلEVO MA15 همراه با طیف پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (EDX) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خوارزمی تهیه شده است.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساده شده از کانسار چنگرزه به همراه ستون چینه‌شناسی و نمایش واحدهای سنگی مختلف در آن (برگرفته از مجموعه معادن سرمک [۶] با تغییرات).

زمین‌شناسی

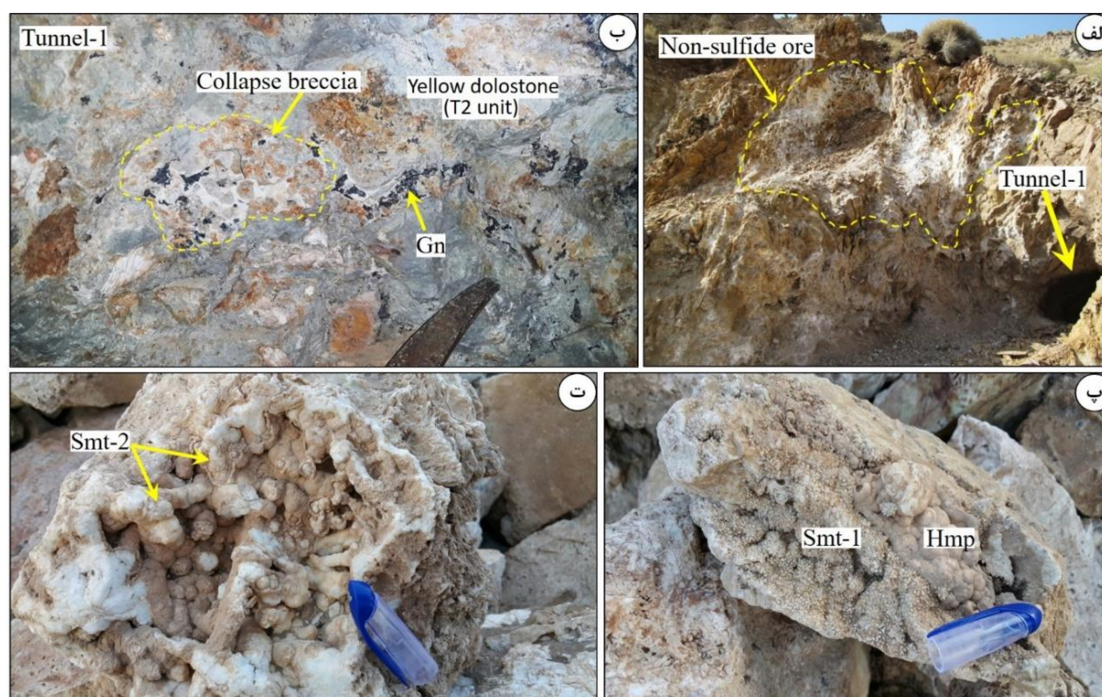
بر اساس پیمایش‌های صحرایی و نقشه‌های زمین‌شناسی محلی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ [۶]، قدیمی‌ترین واحد سنگی رخنمون یافته در منطقه چنگرزه مربوط به واحد آهک تیره و دولومیت فوزولین‌دار (واحد سنگی P2) با ضخامت ۳۵۰ متر بوده که معادل پرمین‌میانی تا پسین (هم ارز سنگ آهک و دولستون سازند جمال) است (شکل ۲). این واحد به عنوان سنگ بستر منطقه در نظر گرفته می‌شود که اغلب در جنوب گستره معدنی چنگرزه رخنمون دارد. پس از آن، واحد سنگی T1 با ضخامت ۵۰ متر شامل ماسه‌سنگ‌های قرمز رنگ کوارتزیت-فلدسپاتی و شیل‌های سیاه دربردارنده ماده آلی (معادل سازند سرخ شیل در ایران مرکزی) به‌صورت همشیب بر افق‌های پرمین تشکیل شده است [۷]. رخنمون‌هایی از این شیل‌ها در تونل-

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]

های زیرزمینی منطقه دیده شد. پس از آن، واحد دولستون زردرنگ (واحد سنگی T2) با ضخامت ۶۱۰ متر همراه میان‌لایه‌های آهک سفیدرنگ و سن تریاس میانی (معادل سازند شتری در ایران مرکزی) با یک ناپیوستگی هم‌شیب بر واحد ماسه‌سنگ و شیلی T1 نهشته شده است. واحد دولستون T2 مهمترین میزبان کانه‌زایی سرب و روی سولفیدی و غیرسولفیدی (کربنات، سیلیکات و اکسید) در منطقه چنگرزه است. واحد سنگی شیل با میان لایه‌های ماسه-سنگ و آهک آمونیت‌دار (واحد سنگی T3) با ضخامت ۵۴۰ متر و سن تریاس پسین به‌صورت همشیب روی دولستون‌های تریاس میانی قرار دارد. بر پایه شواهد صحرایی به‌نظر می‌رسد که این واحد سنگی در اثر فعالیت فاز کوهزایی سیمرین پیشین و پسروی تدریجی پس از تریاس میانی شکل گرفته است [۷]. پس از این واحد، لایه‌های متناوب ماسه‌سنگ و شیل با میان‌لایه آهک آمونیت-دار (واحد سنگی J1) و ضخامت ۹۸۰ متر وابسته به لیاس (معادل سازند شمشک) تشکیل شده‌اند. سنگ آهک اوربیتولین‌دار به‌همراه شیل‌های لای دار و مارن (واحد سنگی K2) با ضخامت ۳۵۰ تا ۵۰۰ متر و سن کرتاسه پیشین روی واحدهای ژوراسیک قرار دارد. این واحد سنگی در شمال منطقه معدنی چنگرزه رخنمون دارد. واحد رسوب های کواترنری (Q^{al}) به‌صورت نهشته‌های آبرفتی به‌ویژه در راستای گسل اصلی منطقه تشکیل شده است.

کانه‌زایی و مراحل رخداد ذخیره

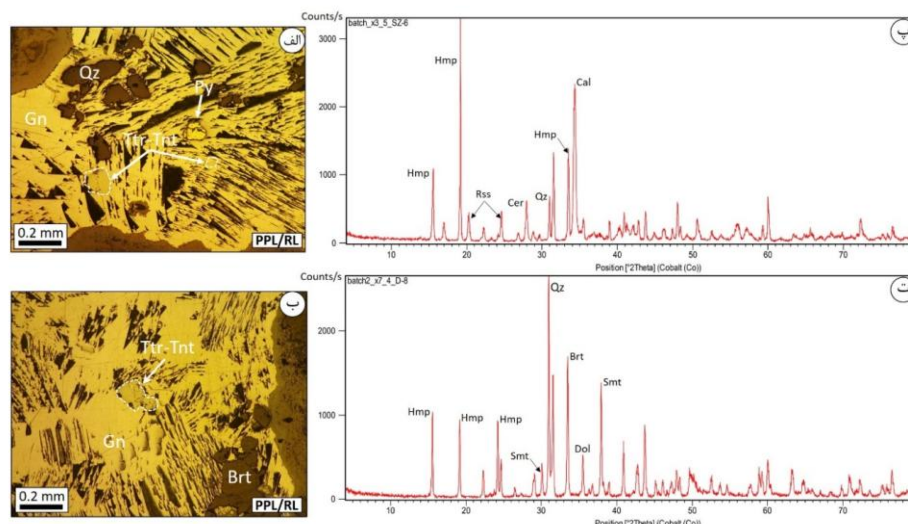
کانسار سرب و روی چنگرزه با سنگ میزبان دولستون (واحد T2) وابسته به سازند شتری (تریاس میانی) در دو منطقه‌ی شرقی (کوه آب انبار) و غربی (کوه تخت‌چال)، شکل گرفته است (شکل ۲). این دو منطقه توسط گسل اصلی چنگرزه با راستای شمال-شمال غرب (NNE) و مولفه چپگرد از هم جدا شده است (شکل ۲). کانه‌زایی در کانسار چنگرزه به دو صورت درون‌زاد (بخش سولفیدی) و برون-زاد (بخش غیرسولفیدی اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی) رخنمون دارد. کانه‌زایی بخش درون‌زاد سولفیدی اغلب در بخش‌های زیرسطحی و تونل ها دیده می‌شود (شکل‌های ۳ الف و ب) که شامل کانه‌های گالن، اسفالریت، پیریت و سولفوسالت (سری تتراهدریت-تنانتیت) هستند. کانه‌زایی برون‌زاد غیرسولفیدی نیز در قالب سه نوع کانسنگ دولومیتی، سیلیکاتی و باریتی به‌ویژه در بخش‌های سطحی رخ داده که شامل کانه‌های اکسیدی (هماتیت و گوتیت)، کربناتی (مالاکیت، اسمیت‌زونیت و سروزیت) و سیلیکاتی (همی‌مورفیت) است (شکل‌های ۳ پ و ت). کانی‌های کلسیت، دولومیت، کوارتز، باریت، سنگ گچ و آراگونیت مهمترین باطله‌های همراه کانه‌زایی هستند.



شکل ۳ تصاویر کانه‌زایی و ساخت و بافت کانسنگ غیرسولفیدی در کانسار چنگرزه: الف) رخنمون کانه‌زایی غیرسولفیدی سرب و روی در دهانه تونل ۱، ب) گالن-های افشان همراه با کانسنگ برشی فروریخته در دیواره تونل ۱، پ) بافت دانه شکری اسمیت‌زونیت در کنار بافت گل‌کلمی همی‌مورفیت، ت) بافت قشری در اسمیت‌زونیت. (گالن Gn، همی‌مورفیت Hmp، اسمیت‌زونیت Smt [۸]).

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]

در مرحله کانه‌زایی سولفیدی، پیریت‌های ریزبلور افشان به‌صورت آزاد یا میانبار در میزبان گالن تشکیل شده‌اند. به همراه گالن، اسفالریت و میانبارهای میکرونی سولفوسالت‌های گروه فهلور (سری تتراهدریت-تنانتیت) نیز تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۴ الف و ب). دگرسانی دولومیتی با حضور دولومیت‌های میکریتی ریزبلور، در این مرحله رخداده است. مرحله کانه‌زایی غیرسولفیدی از دو زیر مرحله شامل ۱) همی‌مورفیت ریزبلور (Hmp-1)، اسمیت‌زونیت بی‌شکل (Smt-1)، میمتیت، نادوریت و انگلزیت همراه باطله‌های کوارتز، کلسیت و دولومیت و ۲) مجموعه کانی‌های همی‌مورفیت بادبزنی (Hmp-2)، اسمیت‌زونیت دارای منطقه‌بندی (Smt-2)، لیتارژ (PbO)، هیدروزینسیت $(Zn_5(CO_3)_2(OH)_6)$، سروزیت و روزازیت، همراه باطله‌های باریت، سنگ گچ و آراگونیت تشکیل شده است (شکل‌های ۴پ و ت). پس از شکل‌گیری کانسنگ سولفیدی و غیرسولفیدی، مجموعه کانی‌های اکسیدی/هیدروکسیدی (زیرمرحله سوم) هماتیت، مالاکیت و گوتیت به صورت ثانویه در اثر فعالیت‌های دگرسانی و شستشوی کانسنگ پیشین تشکیل شدند. مجموعه مراحل رخداد کانسار چنگرزه در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴ الف و ب) تصاویر میکروسکوپی از رخداد میانبارهای ریز سولفوسالت (سری تتراهدریت-تنانتیت) در میزبان گالن، پ و ت) الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) از کانسنگ غیرسولفیدی و حضور کانی‌های همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، روزازیت و سروزیت همراه با کانی‌های باطله کوارتز، باریت، کلسیت و دولومیت. (گالن Gn، پیریت Py، سری تتراهدریت-تنانتیت Ttr-Tnt، همی‌مورفیت Hmp، اسمیت‌زونیت Smt، سروزیت Cer، روزازیت Rss، کوارتز Qz، باریت Brt، کلسیت Cal، دولومیت Dol [۸]).

Minerals \ Stages	Sulfide mineralization	Non-sulfide mineralization: Stage I	Non-sulfide mineralization: Stage II	Non-sulfide mineralization: Stage III
Pyrite	Intermediate			
Galena	Strong			
Sphalerite	Intermediate			
Chalcopyrite	Intermediate			
Sulfosalts	Intermediate			
Hemimorphite		Intermediate	Intermediate	
Smithsonite		Intermediate	Intermediate	
Hydrozincite			Intermediate	
Litharge			Weak	
Cerussite			Weak	
Rosasite			Weak	
Mimmetite		Weak		
Nadorite		Weak		
Malachite				Weak
Anglesite		Weak		
Hematite				Weak
Goethite				Weak
Quartz	Intermediate	Intermediate		
Calcite	Intermediate	Intermediate	Local occurrence	
Dolomite	Intermediate	Intermediate		
Barite			Weak	
Gypsum			Local occurrence	
Aragonite			Weak	

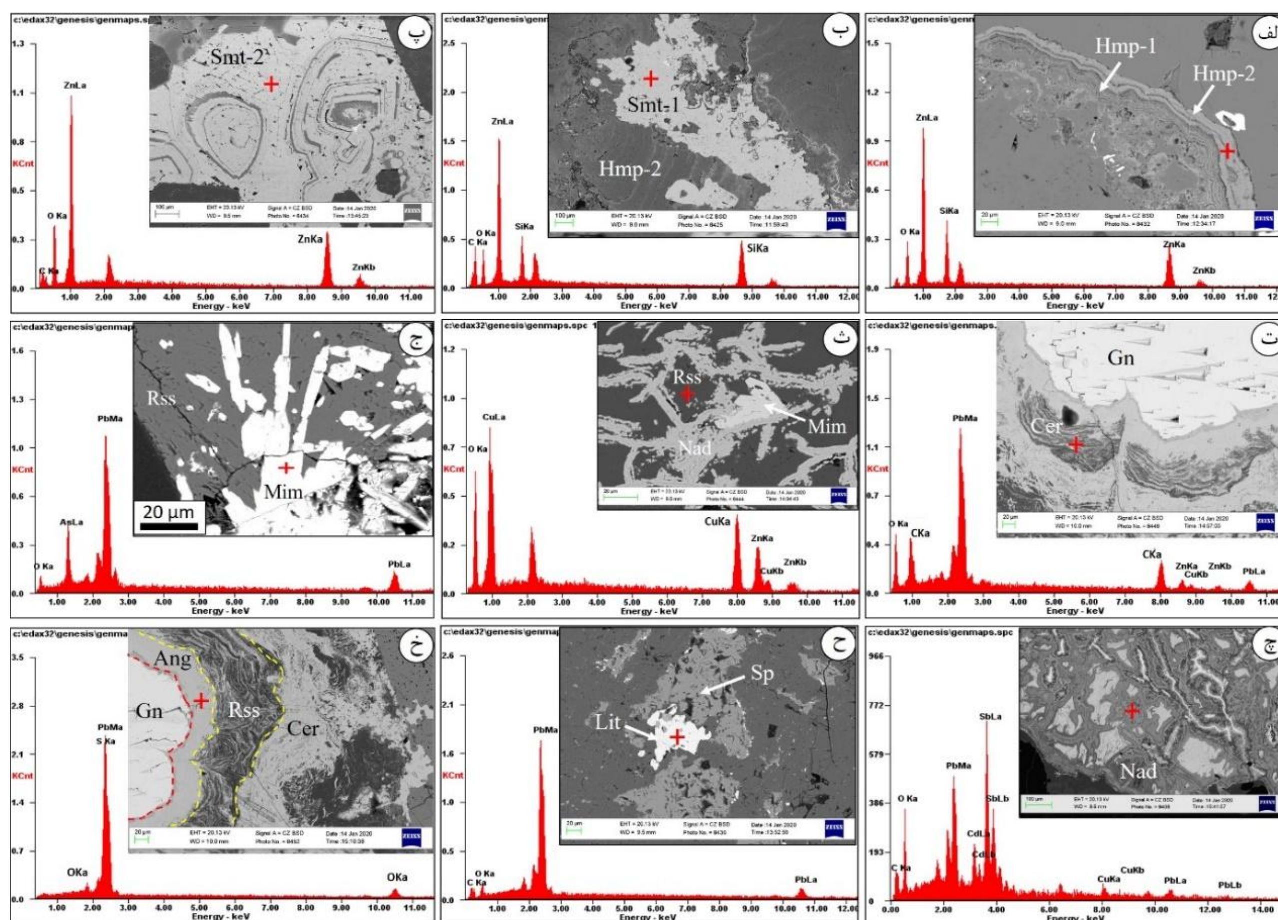
SEM images (Fig. 6)

Strong — Intermediate — Weak - - - - Local occurrence

شکل ۵ جایگاه مجموعه کانی‌های غیرسولفیدی در توالی همبرزایی کانسار چنگرزه.

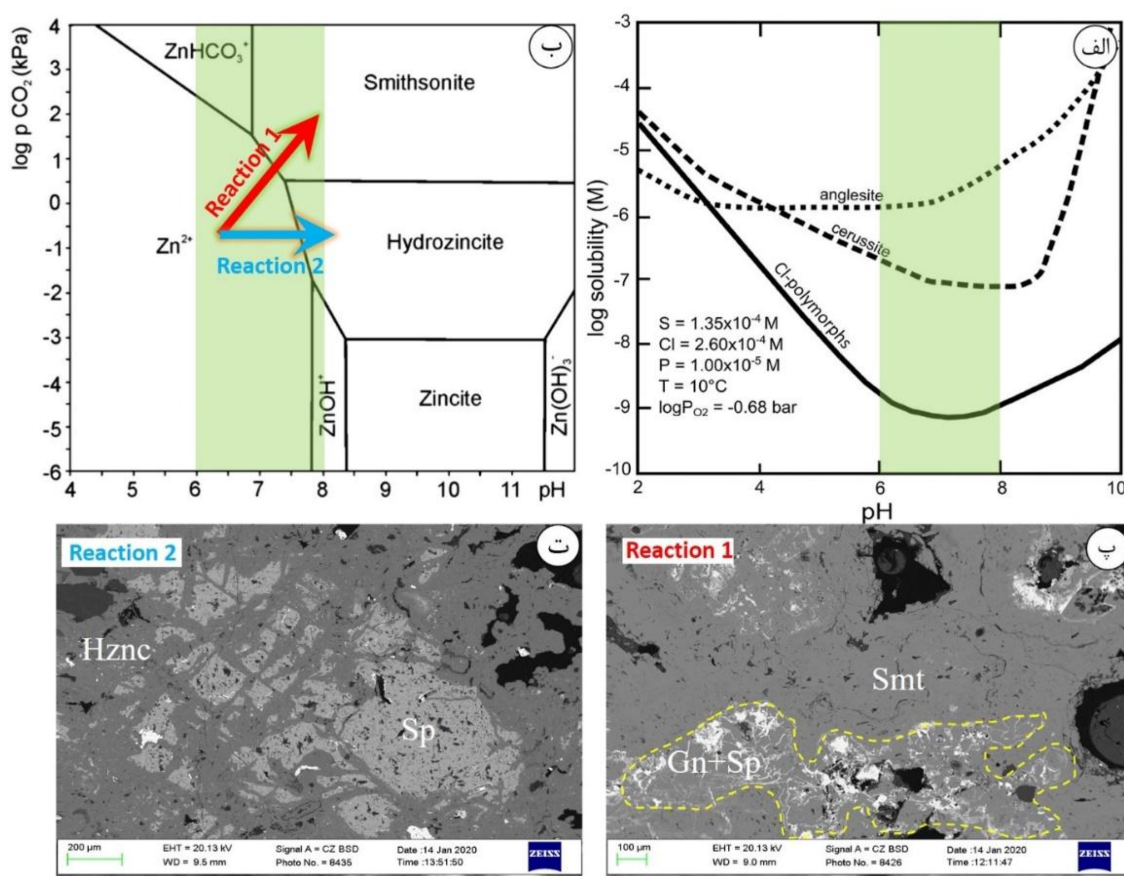
کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ غیرسولفیدی

چنان که اشاره شد، مهمترین کانه‌های فلزی غیرسولفیدی در کانسار چنگرزه شامل اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت، هیدروزینسیت، انگلزیت و سروزیت هستند که کانی‌های کمیاب نادوریت، روزازیت، لیتارژ و میمتیت نیز آنها را همراهی می‌کنند. همی‌مورفیت با ترکیب $Zn_4(Si_2O_7)(OH_2)H_2O$، فراوانترین کانی هیدروکسیدی سیلیکاتی روی است که انبوهه‌های بلوری توده‌ای آن در ذخایر غیرسولفیدی روی با عنوان عمومی کالامین (Calamine) نامیده می‌شود [۹، ۱۰]. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی این کانی با بافت قشری و نواری مشاهده شد (شکل ۶ الف). اسمیت‌زونیت با ترکیب $ZnCO_3$ مهمترین کانی کربناتی روی در اغلب کانسارهای سرب و روی غیرسولفیدی است [۵]. این کانی به‌طور معمول با اسفالریت، گالن، کلسیت، سروزیت و لیمونیت دیده می‌شود. اسمیت‌زونیت را به عنوان کربنات روی می‌شناسند و با توجه به ترکیب و شکل بلورها از همی‌مورفیت متمایز می‌شود. در تصاویر SEM، اسمیت‌زونیت در کانسار چنگرزه در دو نسل یکی بلورهای بی‌شکل (شکل ۶ ب) و دیگری بافت منطقه‌بندی (شکل ۶ پ) قابل مشاهده است. سروزیت با ترکیب $PbCO_3$، مشابه آراگونیت با ساختار راستگوشی متبلور می‌شود. کانی‌های همراه آن بیشتر شامل لیمونیت، مالاکیت و اسمیت‌زونیت هستند. در کانسار چنگرزه سروزیت اغلب به‌صورت جانشینی در لبه بلورهای خوش وجه گالن دیده شد (شکل ۶ ت). هیدروزینسیت $(Zn_5(CO_3)_2(OH)_6)$ با بافت بازماندی از تجزیه اسفالریت‌ها تشکیل شده است (شکل ۷ ت).



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی و طیف‌های EDX از انواع کانی‌های غیرسولفیدی در کانسار چنگرزه: الف) نسل‌های مختلف همی‌مورفیت در کنار هم ب) اسمیت‌زونیت همراه با همی‌مورفیت نسل دوم، پ) بلورهای اسمیت‌زونیت دارای منطقه‌بندی، ت) سروزیت در لبه گالن، ث) روزازیت، ج) بلورهای تیغه‌ای شکل میمتیت، چ) کانی کمیاب نادوریت، ح) لیتاژ، خ) زره پوش شدن گالن توسط انگلزیت. (شامل: گالن Gn، اسفالریت Sp، همی‌مورفیت Hmp، اسمیت‌زونیت Smt، سروزیت Cer، انگلزیت Ang، میمتیت Mim، نادوریت Nad، روزازیت Rss، لیتارژ Lit [۸]).

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]



شکل ۷ الف) نمودار pH نسبت به انحلال‌پذیری فلز [۱۱] که در آن بیشترین میزان ته نشست گونه‌های غیرسولفیدی سرب در گستره pH بین ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود، ب) پایداری گونه‌های مختلف کانی‌های روی در نمودار دوتایی $pH\text{-}logPCO_2(g)$ (برگرفته از مکفیل و همکاران [۱۲]) و روند ته‌نشست کانی‌های اسمیت‌زونیت (واکنش ۱) و هیدروزینسیت (واکنش ۲)، پ) تصویر میکروسکوپ الکترونی از روند شماره ۱ (تجزیه اسفالریت به اسمیت‌زونیت) و ت) تصویر میکروسکوپ الکترونی از روند شماره ۲ (تجزیه اسفالریت به هیدروزینسیت). (گالن Gn، اسفالریت Sp، هیدروزینسیت Hznc، اسمیت‌زونیت Smt [۸]).

روزازیت با ترکیب $(Cu,Zn)_2(CO_3)(OH)_2$ از کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب در کانسار چنگرزه بوده که نام آن از معدن روساس (Rosas) در ساردنیا (ایتالیا) گرفته شده است [۱۳]. سامانه بلوری آن تک میل است و در رده‌بندی کربناتیا قرار می‌گیرد. نادوریت (با ترکیب $PbSbO_2Cl$) یک کانی کلرید آنتیموان و سرب کمیاب در منطقه است که با بافت مشبک اغلب همراه روزازیت و میمتیت دیده می‌شود (شکل‌های ۶ ث و ج). کانی‌های میمتیت (با ترکیب $Pb_5(AsO_4)_3Cl$)، روزازیت و نادوریت به صورت کانی‌های همبرزاد غیرسولفیدی در کانسار چنگرزه هستند. میمتیت اغلب به صورت بلورهای تیغه‌ای کشیده قابل مشاهده است (شکل ۶ چ). اکسید سرب با ترکیب PbO یک کانه ثانویه سرب است. این ترکیب اگر ماهیت بلوری نداشته باشد، ماسیکوت نام دارد، اما پس از تبلور، لیتارژ نامیده می‌شود [۱۴]. این کانی در منطقه چنگرزه به صورت درهم‌رشدی با اسفالریت تشکیل شده است (شکل ۶ ح). انگلزیت ($PbSO_4$) به‌صورت زره پوش (armouring) پیرامون بلورهای گالن شکل گرفته است (شکل ۶ خ). گوتیت با ترکیب FeO(OH) با رنگ قرمز تا قهوه‌ای به ویژه در رخنمون‌های صحرایی و تونل‌های منطقه چنگرزه دیده شد. گوتیت فراوان‌ترین کانی پهنه اکسایشی بوده که در نتیجه اکسیدشدگی کانی‌های سولفیدی اولیه چون پیریت تشکیل شده است.

بحث

کانسارهای سرب و روی غیرسولفیدی برون‌زاد با کنترل‌کننده‌های زمین‌شیمی، سنگ‌شناسی و ساختاری تشکیل می‌یابند [۱، ۱۵]. از

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]

جمله کنترل کننده‌های کلیدی در تشکیل ذخایر غیرسولفیدی سرب و روی با میزبان کربنات، ماهیت و در دسترس بودن کانسنگ سولفیدی نزدیک به سطح، واحد سنگی واکنش‌پذیر، بالاآمدگی زمین ساختی، شرایط اقلیمی و سامانه آب زمین شناسی منطقه هستند [۹، ۱۶]. افزون بر این، اکسایش کانسنگ سولفیدی درون-زاد، آزادسازی فلزها از کانه‌های سولفیدی اولیه، حرکت، انتقال و ته-نشست دوباره آنها توسط سیال‌ها اکسید کننده با منشأ جوی نیز در گسترش کانسنگ غیرسولفیدی نقش موثری دارند [۱۷].

فرایندهای زمین‌شیمیایی-فلززایی

از بارزترین عوامل موثر در شکل‌گیری کانسنگ غیرسولفیدی، فرایند جدایش فلزی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فرایندهای متعددی به‌طور همزمان طی رخداد این نوع کانسنگ‌ها انجام می‌شوند که عبارتند از (۱) حلالیت‌های فلزی و پایداری کانی‌های مختلف روی و سرب، (۲) زره پوش شدن کانه‌ها (بازداری واکنش گالن و کلسیت) و (۳) جذب فلز روی ترکیب‌های سنگ گچ و اکسیدهای آهن آبدار [۱]. گالن در محیط‌های برون‌زاد اغلب با انگلزیت که دربردارنده ذرات میلی‌متری گالن است، دربرگرفته می‌شود. ضخامت پوشش انگلزیت کمتر از ۱۵۰ میکرومتر است که در حضور یون سولفات و pH پایین برپایه واکنش زیر رسوب می‌کند (شکل ۶ خ).



$$Pb^{2+} + SO_4^{2-} \leftrightarrow PbSO_4 \quad (۱)$$

در نتیجه این فرایند، انگلزیت یک زره بر گالن تشکیل داده و آن را از تماس مستقیم با معرف‌های اکسید کننده محیطی محافظت می-کند. تشکیل چنین زره نامحلولی در pH پایین (اسیدی) اغلب با شکل‌گیری کربناتیای سرب نامحلول چون سروزیت یا هیدروسروزیت متناسب با فشار گاز CO_2 برپایه واکنش زیر ادامه می‌یابد (شکل ۶ ت) [۱۸]:

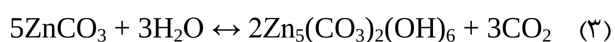


$$PbSO_4 + H_2CO_3 \leftrightarrow PbCO_3 + SO_4^{2-} + 2H^+ \quad (۲)$$

سروزیت به دلیل رفتار غیرمتحرک در منطقه اکسایش و غلظت کم در محلول اولیه، به مقدار بسیار ناچیز تشکیل می‌شود.

نقش سنگ میزبان کربنات، فشار گاز CO_2 و $aSiO_2$

بالا بودن فشار گاز CO_2 به‌دلیل افزایش فعالیت یون‌های آبگین HCO_3^- و CO_3^{2-}، منجربه پایداری اسمیت‌زونیت در سیال اکسیدی می‌شود. براساس گزارش ریچرت و بورگ [۱]، کمترین فشار گاز CO_2 لازم برای تشکیل اسمیت زونیت حدود ۰٫۴ کیلوپاسکال است که در فشارهای بیشتر بر پایه واکنش زیر یدروزینسیت به جای اسمیت‌زونیت جایگزین می‌شود [۱۹].



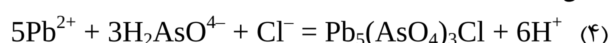
$$5ZnCO_3 + 3H_2O \leftrightarrow 2Zn_5(CO_3)_2(OH)_6 + 3CO_2 \quad (۳)$$

افزون بر آن، بالاترین نرخ انحلال‌پذیری و در پی آن، پیشرفت واکنش‌های اکسایش تشکیل دهنده کانی‌های غیرسولفیدی سرب و روی در pH بین ۶ تا ۸ رخ می‌دهد (شکل ۷ الف). در ناحیه غیراشباع، با ارتباط بیشتر با جو، هیدروزینسیت پایدارتر از اسمیت‌زونیت است، زیرا پایداری اسمیت‌زونیت به فشار گاز CO_2 بالاتری نسبت به فشار جو نیاز دارد [۱۹]. این در حالی است که در آغاز فرایند برون‌زاد در کانسار چنگرزه، سیال‌های اسیدی به آسانی خنثی و بافر می‌شوند و گاز CO_2 از انحلال سنگ میزبان کربناتی به محیط افزوده می‌گردد. این امر منجربه افزایش موقت فشار گاز CO_2 شده که در صورت پایین بودن فعالیت سیلیس ($aSiO_2$)، رسوب اسمیت‌زونیت آغاز می‌شود [۱، ۲۰] (شکل‌های ۷ ب-ت). اگر شرایط زمین‌شیمیایی دوباره متعادل شود، فشار گاز CO_2 به مقادیر فشار جو باز می‌گردد، اسمیت‌زونیت به سرعت هیدراته شده و در پی آن، هیدروزینسیت تشکیل می‌شود [۲۰، ۲۱]. افزون بر این، اگر سیلیس در سامانه موجود باشد، به دلیل بالا رفتن $aSiO_2$، همی‌مورفیت ممکن است همراه با هیدروزینسیت رسوب کند. از سوی دیگر، مقدار بالای همی‌مورفیت در بخش کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چنگرزه (شکل ۳)، گویای وجود منبعی برای سیلیکات است. به احتمال بسیار واحد ماسه‌سنگ کوارتزیت-فلدسپاتی ریزدانه (واحد T1) که در زیر سازند دولستون شتری، منبع مطلوب و ممکن برای سیلیس در همی‌مورفیت‌های کانسار چنگرزه باشد توسط سامانه-های گسلی دچار جابجایی صعودی یا جانبی شده است. رخداد همی‌مورفیت در مرحله پایانی کانسنگ غیرسولفیدی برون‌زاد نشان دهنده کاهش ظرفیت بافری (توانایی یک محلول برای مقاومت در برابر تغییرات pH) کربناتیای میزبان و تحرک بسیار SiO_2 در محیط است [۵].

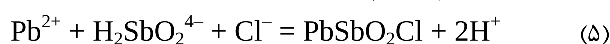
از دیگر نکات در مورد کانی‌های غیرسولفیدی در کانسار چنگرزه حضور مجموعه کانی‌های کمیاب غیرسولفیدی برون‌زاد چون روزازیت، میمتیت و نادوریت است که تصاویر میکروسکوپ الکترونی آنها در شکل ۶ آورده شده است. براساس نمودارهای دوتایی pH نسبت به $\log(aPb^{2+}/a^2H^+)$ (شکل ۸)، این مجموعه کانی‌ها در

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]

شرایط $S = 1.35 \times 10^{-4}$ M، $Cl = 2.60 \times 10^{-4}$ M و $logPO_2$ = -0.68 bar و دمای ۱۰ درجه سانتیگراد (شرایط برونزاد) تشکیل می‌شوند [۱۱]. چنان که دیده می‌شود، با افزایش فشار گاز CO_2 ($logPCO_2$) و فراهم بودن یون‌های Pb^{2+}، شرایط به سمت تشکیل سروزیت پیش می‌رود. در این بین، با فراهم بودن یون کلر در ترکیب سیال برونزاد (به احتمال بسیار برآمده از شورابه‌های اکسایشی غنی از کلر) و وجود عناصر آرسنیک و آنتیموان (ناشی از تجزیه کانه‌های سولفیدی چون گالن)، مجموعه کانی‌های کلریدی میمتیت (واکنش ۴) و نادوریت (واکنش ۵) تشکیل شده اند [۱۱] (شکل ۸ الف):



$$5Pb^{2+} + 3H_2AsO^{4-} + Cl^- = Pb_5(AsO_4)_3Cl + 6H^+ \quad (۴)$$

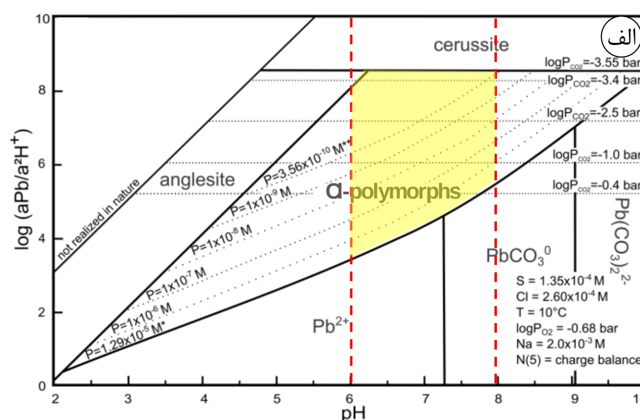


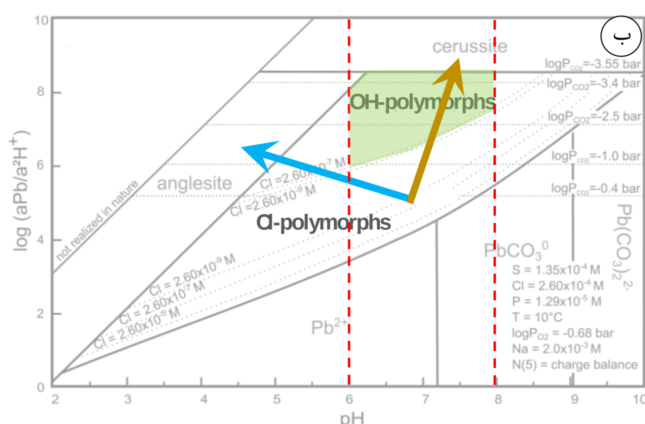
$$Pb^{2+} + H_2SbO_2^{4-} + Cl^- = PbSbO_2Cl + 2H^+ \quad (۵)$$

به همین ترتیب، با افزایش فشار گاز CO_2 ($logPCO_2$) و تخریب بیشتر کانه‌های سولفیدی اولیه چون اسفالریت و کالکوپیریت، کانی‌های هیدروکسیدی کربناتی مس و روی نظیر روزازیت تشکیل شده‌اند (شکل ۸ب).

اثر اقلیم بر سامانه زمین‌شیمیایی و گسترش واکنش‌های اکسایش

یکی دیگر از شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد، وضعیت اقلیمی است. گفتنی است که آب و هوا و همچنین ویژگی‌های سنگ میزبان کربناتی (چون کارستی‌شدن) بر غلظت اکسیژن و CO_2 سیال فرورونده و بنابراین، pH و توانایی سیال برای انحلال کربنات موثر هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ذخایر غیرسولفیدی سرب و روی جهان در طیف گسترده‌ای از شرایط آب و هوایی شکل می‌گیرند [۵]. براساس پژوهش‌های اخیر [۱، ۲۱، ۲۲]، وضعیت آب و هوایی گرم و خشک (مانند کانسار چنگرزه) مساعدترین شرایط برای تشکیل و گسترش واکنش های اکسایش-کاهش کانی‌سازی‌های برونزاد در ایران هستند. در آب و هوای خشک/گرم، افزایش اکسایش سولفیدها به فعالیت ناچیز زیستی در خاک و نرخ پایین پراکندگی، رقیق شدن و حذف عناصر نسبت داده می‌شود. چنین ویژگی‌هایی بیشتر مربوط به سطوح ایستابی عمیق در مناطق خشک/گرم هستند. سطح آب زیرزمینی در آب و هوای خشک اغلب پایین است. این منجربه باز شدن منافذ و درزهای پر از آب پس از یک رویداد بارندگی منفرد شده و بنابراین جریانی از گازهای اکسیژن و CO_2 را درون شبکه کانی سولفیدی فراهم می‌کند [۱، ۱۵، ۱۷]. این سامانه اغلب به دلیل فرایندهای انحلال (کارستی‌شدن) سنگ میزبان کربناتی به یک سامانه بسیار نفوذپذیر تغییر می‌کند. به دلیل دسترسی محدود به آب در اقلیم‌های خشک و ابر خشک، سیال‌هایی که در طی فرایند اکسایش تولید شده‌اند، از نظر روی و سایر فلزها بسیار غنی می‌شوند. این غلظت‌های فلزی بالا از شکل‌گیری کانی‌های فلزی پایه غیرسولفیدی پشتیبانی می‌کنند. بنابراین اقلیم خشک یا نیمه خشک چنگرزه بهترین شرایط را برای اکسایش کانسنگ سولفیدی و در پی آن حفظ کانی‌های غیرسولفیدی فراهم کرده است.





شکل ۸ نمودارهای دوتایی pH نسبت به $\log (aPb/a^2H^+)$ برای نمایش پایداری گونه‌های مختلف گونه‌های غیرسولفیدی سرب [۱۱]: الف) گستره پایداری کانی‌های کلرید سرب چون میمتیت و نادوریت (ناحیه زرد رنگ) و ب) گستره پایداری کربنات هیدروکسیدی مس و روی (روزازیت) (ناحیه سبز رنگ). پیکان قهوه‌ای مسیر تبدیل کانی سولفیدی به سروزیت (شکل ۵ خ) و پیکان آبی مسیر تبدیل کانی سولفیدی به انگلزیت را نشان می‌دهد. گستره پایداری کانی‌های غیرسولفیدی در pH بین ۶ تا ۸ است (خط چین قرمز).

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]

رهیافت پی جویی برای ردیابی ذخایر غیرسولفیدی

ویژگی‌های زمین‌شناسی توصیف‌شده و رفتار زمین‌شیمیایی کانی‌های موجود، فرایند چند مرحله‌ای اکسایش سولفید اولیه و تشکیل کانسنگ سرب و روی غیرسولفیدی را نشان می‌دهد. یک پیش شرط برای یک فرایند اکسایش کارآمد، در دسترس بودن اکسیژن در یک محیط نزدیک به سطح است. بالا آمدن پوسته و پدیده سربرآوردی (exhumation) سنگ میزبان کربناتی و سولفید موجود در آن باید پیش از هر فرایند اکسایش برون‌زاد صورت گیرد. در مورد کانسار چنگرزه، یک فرایند بالا بردن قوی به ویژه از شروع برخورد صفحه عربستان به ایران وجود دارد. در پی آن، توالی کربناتی توسط آب‌های جوی و زیرزمینی نفوذ می‌کند که منجربه گسترش فرایندهای کارستی با گسل و شکستگی می‌شود. سامانه کارست، به نوبه خود، جریان اکسیژن و در نتیجه فرایند اکسایش کانسنگ سولفیدی را افزایش می‌دهد. بخش‌های ناپیوسته، شکستگی‌ها و برش‌های فروریخته (collapse breccias) نیز به‌عنوان مجرای سیالهای برون‌زاد عمل می‌کنند [۱۷]. چنین برش‌های انحلالی (کارست) دارای سطح واکنشی به نسبت بزرگی از قطعه‌های برش و افزایش نفوذپذیری و تخلخل برای ته نشست کانسنگ غیرسولفیدی هستند که شواهد آن در دیواره تونل ۱ کانسار چنگرزه دیده می‌شود (شکل ۳ ب). بخش عمده‌ای از کانی‌های غیرسولفیدی سرب و روی به‌صورت سیمان همراه قطعه-های برش تشکیل می‌شوند. مدل زمین‌شیمیایی برای تشکیل ذخایر سرب و روی غیرسولفیدی با سنگ میزبان کربناتی ارائه شده در اینجا به نفع یک آب و هوای خشک (تا نیمه خشک) برای پیدایش آنها است. با این حال، شرایط آب و هوایی در این منطقه جغرافیایی طی زمان بین شرایط مرطوب و ابر خشک تغییر کرده [۲۳] و در نتیجه بر پیدایش منطقه مورد بررسی نیز اثر گذاشته و منجربه تغییر پایداری مواد معدنی شده است. این شرایط جغرافیایی دیرینه پیشتر برای کانسار سرب و روی مهدی آباد توسط ریچرت و همکاران [۲۴] گزارش شده است.

برداشت

بررسی‌های زمین‌شیمیایی-فلززایی انجام شده شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی با سنگ میزبان کربناتی را مشخص می‌کند و نتایج این بررسی‌ها و فرایندهای نظری با مشاهده رخدادهای کانسار چنگرزه همخوانی دارند. فرایند بالا آمدن پوسته به‌ویژه از آغاز برخورد صفحه عربستان به ایران، موجب رخنمون کانسنگ سولفیدی درون‌زاد و در پی آن واکنش‌های گسترده و تشکیل پهنه برون‌زاد غیرسولفیدی سرب و روی در کانسار چنگرزه شده است. دست کم یک محیط خشک به‌ویژه برای تشکیل کانی‌های سرب و روی غیرسولفیدی با عیار بالا مطلوب است، در حالی که آب و هوای مرطوب و موقعیت عمیق سولفیدی اولیه اغلب اثربخشی تشکیل کانی‌های غیرسولفیدی سرب و روی را کاهش می‌دهد. بارزترین نتیجه این پژوهش شناسایی دو مرحله مجزا، از نظر زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی در گسترش کانسنگ سرب و روی برون‌زاد است. ارتباط کانسنگ غیرسولفیدی برون‌زاد چنگرزه با تنوع زیادی از بافت‌های کانی‌های سرب و روی مشخص می‌شود که شامل اسمیت‌زونیت و همی‌مورفیت به عنوان فازهای اصلی و سروزیت و هیدروزینسیت به عنوان اجزای فرعی است. کانی‌های غیرسولفیدی با تجزیه سولفیدهای سرب و روی اولیه از طریق فرایندهای برون‌زاد چندمرحله‌ای در آب و هوای خشک/گرم و افزایش اکسایش سولفیدها، که منطقه چنگرزه، تشکیل شده‌اند.

قدردانی

بدین وسیله از حمایت شرکت معادن سرمک برای همکاری در بازدید صحرایی و انجام برخی از تجزیه‌های دستگاهی قدردانی می-شود. از داوران مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران به‌دلیل دقت نظر و پیشنهادهای سازنده سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Reichert J., Borg G., "*Numerical simulation and geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulfide zinc deposits*". Ore Geology Reviews (2008) 33, 134–151.

[2] Paradis S., Simandl G.J., Keevil H., Raudsepp A., "*Carbonate-Hosted Nonsulfide Pb-Zn Deposits of the Quesnel Lake District, British Columbia, Canada*". Economic Geology (2016) 111, 179–198.

[3] Maanijou M., Tale Fazel E., Hayati S., Mohseni H., Vafaei M., "*Geology, fluid inclusions, C–O–S–Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western*

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]

[14] Worthing M., Sutherland H., "*The composition and origin of massicot, litharge (PbO) and a mixed oxide of lead used as a traditional medicine in the Arabian Gulf*". Mineralogical Magazine (1996) 60, 509-513.

[15] Choulet F., Charles N., Barbanson L., Branquet Y., Sizaret S., Ennaciri A., Badra L., Chen Y., "*Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan High Atlas: multiscale characterization and origin*". Ore Geology Reviews (2014) 56, 115–140.

[16] Borg G., "*A review of supergene non-sulfide zinc (SNSZ) deposits the 2014 update*". In: Archibald SM, Piercey SJ (eds) Current Perspectives of Zinc deposits. Irish Association for (2015) Economic Geology, Dublin, 123–147.

[17] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Choulet F., "*Supergene nonsulfide Zn–Pb mineralization in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type deposit, Iran*". International Journal of Earth Sciences (2020) 109, 2531–2555.

[18] Sangameshwar S.R., Barnes H.L., "*Supergene processes in zinc–lead–silver sulfides ores in carbonates*". Economic Geology (1983) 78, 1379–1397.

[19] Takahashi T., "*Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone*". Economic Geology (1960) 55, 1083–1115.

[20] Arfè G., Mondillo N., Boni M., Balassone G., Joachimski M., Mormone A., Di Palma T., "*The Karst-Hosted mina grande non-sulfide zinc deposit, Bongara District (Amazonas Region, Peru)*". Economic Geology (2017) 112, 1089–1110.

[21] Reichert J., "*A geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulfide zinc deposits*". In: Titley SR (ed) Supergene Environments, Processes, and Products. Society of Economic Geologists (2009) Special Publication, pp 69–76.

[22] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F., "*Hypogene Iran*". Journal of Asian Earth Sciences (2020) 195, 104339.

[4] Tale Fazel E., "*Petrography and chemical composition of dolomites in the Khan Sormeh Pb-Zn deposit (western Isfahan) and relationship with sulfide mineralization*". Applied Sedimentology (2021) 11, 65-80.

[5] Hitzman M.W., Reynolds N.A., Sangster D.F., Allen C.R., Carman C., "*Classification, genesis and exploration guides for non-sulfide zinc deposits*". Economic Geology (2003) 98, 685–714.

[6] Sormak Mines Co., 2015. "*Exploration report of the Changarzeh deposit*", pp. 59.

[7] Zahedi M., Rahmati M., “*Targh geological map, scale 1:100,000*”. Geological Survey of Iran (2000).

[8] Warr L.N., "*IMA-CNMNC approved mineral symbols*". Mineralogical Magazine (2021) 85, 291–320.

[9] Large D., "*The geology of non-sulfide zinc deposits — an overview*". Erzmetall (2001) 54, 264–274.

[10] Hitzman M.W., "*Zinc oxide and zinc silicate deposits—a new look*". Geological Society of America, Program with Abstracts (2001) 33, 1–336.

[11] Keim M.F., Markl G., "*Weathering of galena: Mineralogical processes, hydrogeochemical fluid path modeling, and estimation of the growth rate of pyromorphite*". American Mineralogist (2015) 100, 1584–1594.

[12] McPhail D.C., Summerhayes E., Welch S., Brugger J., "*The Geochemistry of Zinc in the Regolith*". In: Roach, I.C. (Ed.), Advances in Regolith. CRC for Landscape Environments and Mineral Exploration, (2003) 287–291.

[13] Frost R.L., Jagannadha Reddy B., Wain D.L., Martens W.N., "*Identification of the rosasite group minerals—An application of near infrared spectroscopy*". Spectrochemical Acta Part A. Molecular and Biomolecular Spectroscopy (2007) 66, 1075-1081.

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]

[24] Reichert J., Borg G., Rashidi B., "*Mineralogy of calamine ore from the Mehdi Abad zinc-lead deposit, Central Iran*". In: Eliopoulos DG (ed) Mineral Exploration and Sustainable Development. Millpress, Rotterdam (2003), 97–100.

Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran". Mineralium Deposita (2007) 42, 799–820.

[23] Sadiq A.M., Nasir S.J., "*Middle Pleistocene karst evolution in the State of Qatar, Arabian Gulf*". Journal of Cave and Karst Studies (2002) 64, 132–139.

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.709]